

# ABSORPSI CO<sub>2</sub> DENGAN LARUTAN KOH DALAM TANGKI BERPENGADUK DAN BERBAFFLE

Panut Mulyono<sup>1</sup> dan Adji Swandito<sup>2</sup>

## ABSTRACT

*This study investigates mass transfer coefficient and reaction rate constant in the absorption of CO<sub>2</sub> into aqueous solution of KOH. The experiments were carried out by bubbling CO<sub>2</sub> from the bottom of a stirred tank containing KOH solution. The inner diameter of the stirred tank was 14 cm and the depth was also 14 cm. The tank was equipped with 4 baffles each of 2.5 cm in width and 12 cm in height. The stirrer was a flat blade agitator of 5 cm in length and 1.5 cm in width. The sparger was made of copper pipe with the holes diameter of 1.5 mm.*

*The effects of KOH concentration in the solution and operating temperature on mass transfer coefficient and reaction rate constant have been studied. The effect of KOH concentration ( $C_{B,0}$ ) on the mass transfer coefficient ( $K_L$ ) can be expressed as  $K_L = 0.00017 \ln C_{B,0} + 0.0179$ , in the range of  $C_{B,0}$  of 0.0752 to 0.3445 g/mol/L. The relative mean error for this expression is 1.92%. The correlation between the chemical rate constant ( $k_{mn}$ ) with the operating temperature ( $T$ ) is  $k_{mn} = 10^7 \cdot \exp(-11,501.75/RT)$ , for the operating temperature of 303 to 333 K with the relative mean error of 3.78%.*

**Keywords:** Absorption, carbon dioxide, potassium hydroxide, stirred tank.

## PENDAHULUAN

Absorpsi merupakan salah satu cara pemungutan suatu zat dalam campuran gas dengan media penyerap berupa zat cair. Absorpsi dapat berlangsung bila terjadi kontak antara fasa gas dan fasa cair dalam waktu yang mencukupi, seperti misalnya dalam alat kolom dinding basah, tangki berpengaduk atau menara bahan isian (Treybal, 1981). Dalam industri kimia, seringkali proses absorpsi ini harus diikuti dengan reaksi kimia untuk lebih memperbesar kapasitas penyerapannya (Purwasmita, 1985).

Gas dan cairan dapat dikontakkan secara baik dengan pendispersian gas dalam bentuk gelembung dalam tangki berpengaduk. Hal ini umumnya dilakukan jika diinginkan terjadi reaksi kimia antara gas terlarut dengan zat yang ada dalam cairan. Operasi penyerapan gas dengan cairan dalam tangki berpengaduk dapat dilakukan secara *batch*, *semibatch* yaitu gas dialirkan secara kontinyu dalam sejumlah cairan yang tetap atau secara kontinyu, yaitu gas dan cairannya dialirkan secara kontinyu (Treybal, 1981).

Banyak peneliti telah mempelajari penyerapan CO<sub>2</sub> dengan berbagai jenis pelarut. Shen dkk. (1999) meneliti absorpsi CO<sub>2</sub> dengan larutan amoniak terkarbonasi sebagian. Danckwerts dan McNeil (1967) mempelajari pengaruh katalis pada absorpsi CO<sub>2</sub> ke dalam larutan *amine*. Astarita dkk. (1981) melaporkan hasil penelitiannya tentang peningkatan kecepatan perpindahan massa pada absorpsi CO<sub>2</sub> dalam larutan karbonat.

Penyerapan CO<sub>2</sub> dari campuran gas juga biasa dilakukan dengan larutan KOH, karena harganya cukup murah dan mudah untuk diperoleh. Selain itu, larutan KOH bersifat stabil dan mudah bereaksi dengan CO<sub>2</sub> (Sherwood dan Pigford, 1952).

Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan nilai koefisien perpindahan massa dan konstanta kecepatan reaksi pada absorpsi CO<sub>2</sub> dengan larutan KOH dalam tangki berpengaduk dan berbaffle, serta menentukan persamaan yang menghubungkan kedua konstanta tersebut dengan peubah-peubah yang dipelajari, yaitu konsentrasi awal KOH dalam larutan dan suhu operasi atau suhu larutan KOH.

Sesuatu yang baru dalam penelitian ini atau perbedaan penelitian ini dengan penelitian-penelitian sebelumnya adalah tentang alat percobaan berupa tangki berpengaduk yang dioperasikan secara semi kontinyu. Pohorecki dan Moniuk (1988) mempelajari kinetika reaksi antara CO<sub>2</sub> dengan ion-ion hidroksil dalam larutan elektrolit menggunakan *laminar-jet absorber*, Essaki dkk. (2004) mempelajari penyerapan CO<sub>2</sub> dengan litium silikat pada suhu kamar menggunakan kolom absorpsi, dan Wang dan Li (2004) mempelajari kinetika absorpsi CO<sub>2</sub> dalam larutan 2-amino-2-methyl-1-propanol + diethanolamine menggunakan kolom dinding basah. Hal lain yang baru dalam penelitian ini adalah evaluasi nilai koefisien perpindahan massa keseluruhan dan nilai konstanta kecepatan reaksi secara simultan menggunakan model matematik yang disusun berdasarkan neraca massa.

## LANDASAN TEORI

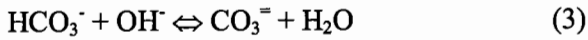
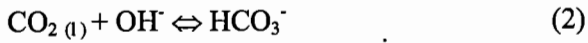
Absorpsi merupakan peristiwa perpindahan massa dari fasa gas ke fasa cair melalui lapisan batas antar fasa. Absorpsi dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu absorpsi fisis (absorpsi yang tidak disertai dengan reaksi kimia) dan absorpsi kimia (absorpsi yang disertai dengan reaksi kimia).

<sup>1</sup> Ir. Panut Mulyono, M.Eng., D.Eng., dosen Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik UGM.

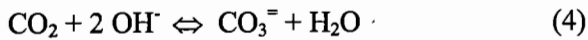
<sup>2</sup> Adji Swandito, ST., alumnus Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik UGM.

(Purwasasmita, 1985). Pada absorpsi kimia, kecepatan proses secara keseluruhan dipengaruhi oleh kecepatan perpindahan massa gas dari fasa gas ke fasa cair dan kecepatan reaksi kimianya di fasa cair.

Dalam perpindahan massa CO<sub>2</sub> dari fasa gas ke dalam larutan yang mengandung ion hidroksida, terjadi reaksi sebagai berikut:



Reaksi totalnya adalah:



Reaksi (1) merupakan proses absorpsi fisis gas ke dalam larutan dan berjalan sangat cepat. Reaksi (3) berjalan lebih cepat dari pada reaksi (2) sehingga kecepatan reaksi keseluruhan ditentukan oleh reaksi (2) (Pohorecky dan Moniuk, 1988).

Perpindahan massa CO<sub>2</sub>, selanjutnya dilambangkan dengan A, dari fasa gas ke fasa cair dapat digambarkan sesuai dengan teori dua lapisan filem pada Gambar 1. Kecepatan perpindahan massa CO<sub>2</sub> dari fasa gas ke fasa cair dapat dituliskan sebagai berikut:

$$r_{A,ab} = k_G a (p_{A,G} - p_{A,i}) \quad (5)$$

atau

$$r_{A,ab} = k_L a (C_{A,i} - C_{A,L}) \quad (6)$$

Hukum Henry untuk system gas-cair adalah (Levenspiel, 1972):

$$p_{A,i} = H_A C_{A,i} \quad (7)$$

dan

$$p_{A,G} = H_A C_A^* \quad (8)$$

Substitusi Persamaan (7) dan (8) ke Persamaan (5) lalu gabungkan dengan Persamaan (6), maka diperoleh persamaan berikut:

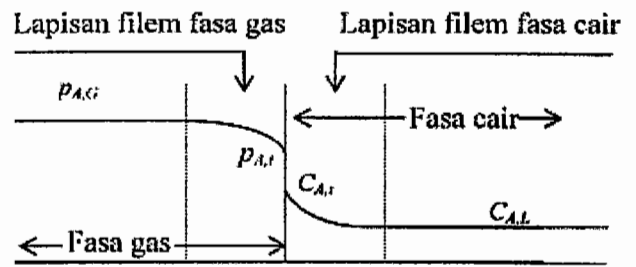
$$r_{A,ab} = \frac{C_A^* - C_{A,L}}{\frac{1}{H_A k_G a} + \frac{1}{k_L a}} \quad (9)$$

atau

$$r_{A,ab} = K_L a (C_A^* - C_{A,L}) \quad (10)$$

dengan:

$$\frac{1}{K_L a} = \frac{1}{H_A k_G a} + \frac{1}{k_L a} \quad (11)$$



Gambar 1. Profil konsentrasi CO<sub>2</sub> (A) pada batas fasa gas-cair.

Dari data tetapan Henry CO<sub>2</sub> di air yang terdapat di literatur (Astarita dkk., 1983), dapat dibuat sebuah persamaan hubungan antara tetapan Henry dengan suhu sebagai berikut:

$$\frac{1}{H_A^0} = -2,0959 + 2,1549(1000/T) - 0,7418(1000/T)^2 + 0,0861(1000/T)^3 \quad (12)$$

Tetapan Henry CO<sub>2</sub> dalam larutan dihitung dengan persamaan (Astarita dkk., 1983):

$$\log(H_A/H_A^0) = 0,125 C_{B,0} \quad (13)$$

Untuk mencari diameter gelembung rerata pada disperse gas dalam cairan yang diaduk, digunakan persamaan empiris berikut (Treybal, 1981):

$$d_g = K \left[ \left( \frac{\nu_L}{P_G} \right)^{0.4} \left( \frac{\sigma^3 g_c}{\rho_L} \right)^{0.2} \right] \varphi_G^\theta \left( \frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.25} \quad (14)$$

dengan

$$\varphi_G = \left[ 0,24 K \left( \frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.25} \left( \frac{V_G}{V_i} \right)^{1/2} \right]^{1/(1-\theta)} \quad (15)$$

Luas permukaan per satuan volume (*a*) yang merupakan luas permukaan efektif perpindahan massa ditentukan dengan Persamaan (16) (Treybal, 1981):

$$a = \frac{6\varphi_G}{d_g} \quad (16)$$

Kecepatan reaksi antara CO<sub>2</sub> (A) dengan KOH (B) di fasa cair dianggap mengikuti persamaan berikut:

$$(-r_{A,reaksi}) = k_{mn} C_A^m C_B^n \quad (17)$$

dengan *m* = 1 dan *n* = 1 (Pohorecky and Moniuk, 1988).

## MODEL MATEMATIK

Pada penelitian ini, dibuat model matematik yang diharapkan dapat mewakili proses absorpsi  $\text{CO}_2$  ke dalam larutan KOH yang dijalankan dalam sebuah tangki berpengaduk dan ber**baffle**. Dalam penyusunan model matematik ini diambil asumsi-asumsi sebagai berikut: 1) Volume dan sifat-sifat fisis larutan tetap selama proses berlangsung, 2) Gas  $\text{CO}_2$  yang digunakan mengikuti hukum gas ideal, 3) Kelarutan gas  $\text{CO}_2$  dalam larutan KOH mengikuti hukum Henry dan dianggap kesetimbangan dapat tercapai pada *interface*, 4) Tekanan gas dalam gelembung dianggap sama dengan tekanan yang terukur pada manometer air raksa, 5) Sistemnya isothermal.

Dengan memperhitungkan adanya pengaruh difusi dan konversi serta dengan berdasarkan anggapan-anggapan di atas, maka dapat disusun neraca massa  $\text{CO}_2$  (A) pada fasa cair sebagai berikut:

Kecepatan massa  $\text{CO}_2$  masuk – kecepatan massa  $\text{CO}_2$  keluar – kecepatan massa  $\text{CO}_2$  yang bereaksi = kecepatan akumulasi massa  $\text{CO}_2$ :

$$K_L a (C_A^* - C_{A,L}) V - 0 - k_{mn} C_A C_B V = \frac{d}{dt} (V C_A) \quad (18)$$

Analog dengan  $\text{CO}_2$ , maka dari neraca massa KOH (B) pada fasa cair diperoleh persamaan:

$$0 - 0 - 2k_{mn} C_A C_B V = \frac{d}{dt} (V C_B) \quad (19)$$

Dari persamaan (18) dan (19) lalu dapat disusun persamaan diferensial simultan sebagai berikut:

$$\frac{dC_A}{dt} = K_L a (C_A^* - C_{A,L}) - k_{mn} C_A C_B \quad (20)$$

$$\frac{dC_B}{dt} = -2k_{mn} C_A C_B \quad (21)$$

Kondisi awal untuk Persamaan (20) dan (21) adalah  $t = 0$ ;  $C_A = 0$ ;  $C_B = C_{B,0}$ . Jika nilai  $K_L a$  pada Persamaan (20) dan nilai  $k_{mn}$  pada Persamaan (20) dan (21) tertentu, maka Persamaan (20) dan (21) dapat diselesaikan untuk memperoleh nilai  $C_A$  dan  $C_B$  sebagai fungsi waktu. Dalam penelitian ini, Persamaan (20) dan (21) diselesaikan dengan metode *Runge-Kutta* dengan memilih nilai  $K_L a$  dan  $k_{mn}$  yang paling tepat. Penentuan nilai  $K_L a$  dan  $k_{mn}$  dilakukan berdasarkan pada nilai  $K_L a$  dan  $k_{mn}$  yang memberikan nilai  $C_A$  dan  $C_B$  terhitung paling mendekati nilai  $C_A$  dan  $C_B$  hasil percobaan. Kondisi tersebut ditunjukkan dengan nilai *sum of square of error* (SSE) yang minimum. Nilai SSE dihitung dengan Persamaan (22). Dalam penelitian ini, minimasi nilai SSE dilakukan dengan metode *Hooke-Jeeves*.

$$\text{SSE} = \sum [(C_B)_{\text{hitung}} - (C_B)_{\text{data}}]^2 \quad (22)$$

Setelah diperoleh nilai  $K_L a$  yang benar dan nilai  $a$  dihitung dengan Persamaan (16), maka dapat ditentukan nilai  $K_L$ . Dalam penelitian ini juga dihitung nilai  $d_g$  dengan Persamaan (14). Untuk keperluan perhitungan nilai  $C_A^*$  maka nilai  $H_A^o$  dan  $H_A$  masing-masing dihitung dengan Persamaan (12) dan (13).

## PELAKSANAAN PENELITIAN

### Bahan

Kalium hidroksida (KOH), berbentuk kristal berwarna putih dengan berat molekul 56,11 g/gmol. Larutan KOH berfungsi sebagai larutan penyerap. Asam klorida (HCl) dengan kadar 37% dan berat jenis 1,19 g/cm<sup>3</sup>, digunakan untuk titrasi larutan hasil. Boraks ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), berbentuk serbuk berwarna putih dengan berat molekul 381,37 g/gmol, digunakan untuk standarisasi HCl. Air suling ( $\text{H}_2\text{O}$ ), dengan berat jenis 0,9962 g/cm<sup>3</sup>. *Phenol Phtalein* (PP) dan *Metyl Orange* (MO) digunakan sebagai indikator. Semua bahan di atas diperoleh dari Laboratorium Teknologi Kimia Umum Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik UGM. Gas  $\text{CO}_2$  dengan kemurnian 99,98%, diperoleh dari PT Prax Air, Yogyakarta.

### Alat

Susunan alat penelitian yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2. Tangki berpengaduk yang digunakan dalam penelitian ini berdiameter 14 cm dan tingginya juga 14 cm. Tangki itu dilengkapi dengan 4 buah *baffle* masing-masing dengan lebar 2,5 cm dan tinggi 12 cm. Pengaduk yang digunakan berupa *flat blade* dengan panjang dan lebar *blade* masing-masing adalah 5 cm dan 1,5 cm. Alat penggelembung  $\text{CO}_2$  dibuat dari pipa tembaga, melingkar dengan diameter lubang rerata 1,5 mm.

### Cara Penelitian

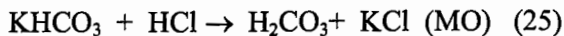
Larutan KOH dengan konsentrasi tertentu dimasukkan ke dalam tangki yang telah dirangkai seperti pada Gambar 2. *Waterbath* dihidupkan untuk mengatur suhu operasi yang diinginkan. Pengaduk dijalankan dengan kecepatan putaran pengaduk 200 putaran per menit (rpm). Setelah dicapai kondisi yang stabil,  $\text{CO}_2$  digelembungkan melalui *sparger* dengan debit yang tetap, yaitu 0,1 mL/detik dengan tekanan 1,0314 atm. Setiap selang waktu 2 menit diambil sejumlah cuplikan larutan dari dalam tangki untuk dianalisis konsentrasi KOHnya sehingga dapat diketahui konsentrasi sisa KOH dalam larutan sebagai fungsi waktu. Dalam penelitian ini, variabel yang diteliti adalah konsentrasi KOH dalam larutan penyerap dan suhu operasi atau suhu larutan KOH.

## Analisis Data Percobaan

Analisis konsentrasi KOH dilakukan dengan cara titrasi menggunakan larutan HCl standar, dengan indikator PP dan MO. Pada titrasi ini terjadi dua titik ekuivalen. Mula-mula, cuplikan larutan hasil dititrasi menggunakan larutan HCl standar dengan indikator PP. Reaksi kimia yang terjadi adalah:



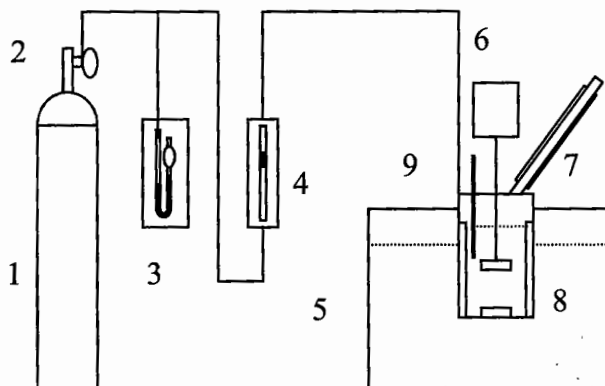
Setelah dicapai titik ekuivalen I, titrasi dilanjutkan dengan indikator MO hingga dicapai titik ekuivalen II.



Jika titik ekuivalen I memerlukan  $V_a$  mL HCl dan titik ekuivalen II  $V_b$  mL maka dalam  $V$  mL larutan hasil absorpsi dapat ditentukan:

$$\text{KOH sisa} = C_B = (V_a - V_b) \cdot N_{\text{HCl}} \text{ mgrek/V mL}$$

$$C_B = \frac{(V_a - V_b)}{V} \cdot N_{\text{HCl}} \text{ gmol/L} \quad (26)$$



Keterangan gambar:

- 1) Tabung gas; 2) Regulator gas; 3) Manometer;  
4) Flowmeter; 5) Waterbath; 6) Motor pengaduk;  
7) Pendingin balik; 8) Tangki berbaffle; 9) Termometer.

Gambar 2. Rangkaian alat penelitian.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

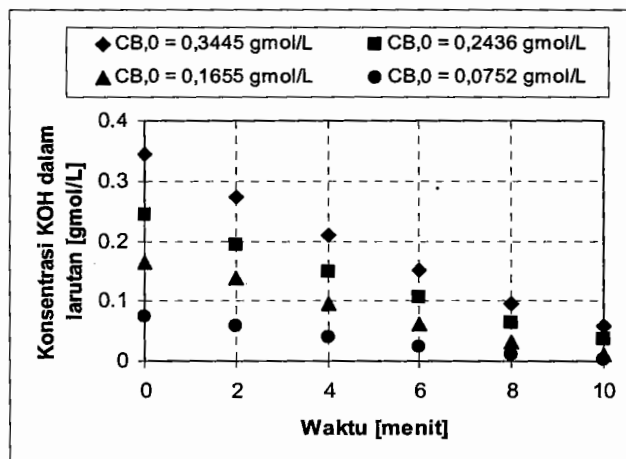
### Pengaruh Kadar KOH dalam Larutan Penyerap

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh profil kadar atau konsentrasi larutan penyerap (KOH) sebagai fungsi waktu untuk berbagai konsentrasi awal KOH dalam larutan penyerap. Hasil penelitian secara lengkap untuk empat macam konsentrasi KOH awal dalam larutan penyerap ditunjukkan pada Daftar I. Dari data pada Daftar I, lalu dibuat grafik hubungan antara konsentrasi KOH

( $C_B$ ) dengan waktu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Saat  $\text{CO}_2$  mulai didelembungkan ke dalam larutan penyerap, yaitu larutan KOH, ditunjukkan dengan  $t = 0$ . Dari Daftar I dan Gambar 4 dapat dilihat bahwa konsentrasi KOH semakin berkurang seiring dengan bertambahnya waktu. Penurunan konsentrasi KOH ini karena sebagian KOH bereaksi dengan  $\text{CO}_2$  yang terserap ke dalam larutan.

Daftar I. Konsentrasi KOH ( $C_B$ ) sebagai fungsi waktu untuk berbagai konsentrasi awal KOH dalam larutan penyerap ( $T = 301 \text{ K}$ ,  $Q_G = 0,1 \text{ mL/detik}$ ,  $p_A = 1,0314 \text{ atm}$ , dan  $N_r = 200 \text{ rpm}$ ).

Waktu [menit]	Konsentrasi [gmol/L]			
	$C_{B,0} = 0,0752$	$C_{B,0} = 0,1655$	$C_{B,0} = 0,2436$	$C_{B,0} = 0,3445$
0	0,0752	0,1655	0,2436	0,3445
2	0,0588	0,1365	0,1932	0,2726
4	0,0406	0,0963	0,1472	0,2101
6	0,0240	0,0618	0,1048	0,1504
8	0,0108	0,0328	0,0645	0,0950
10	0,0020	0,0104	0,0358	0,0581



Gambar 4. Grafik hubungan antara konsentrasi KOH ( $C_B$ ) dengan waktu pada berbagai konsentrasi awal KOH.

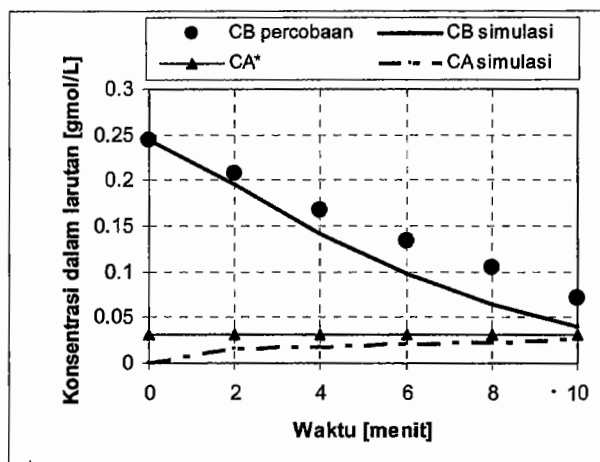
Selanjutnya dilakukan simulasi untuk mencari nilai  $K_{La}$  dan  $k_{mn}$  dari proses penyerapan itu. Dengan kondisi awal yang ada, nilai  $K_{La}$  dan  $k_{mn}$  dicari sehingga nilai  $C_B$  terhitung sesuai dengan nilai  $C_B$  hasil percobaan. Contoh hasil simulasi dan bandingannya dengan hasil percobaan untuk  $C_{B,0} = 0,2436 \text{ gmol/L}$  ditunjukkan pada Daftar II dan Gambar 5. Nilai  $K_{La}$  dan  $k_{mn}$  untuk kondisi ini masing-masing adalah  $0,020007/\text{menit}$  dan  $0,0973 \text{ L/gmol/menit}$ . Nilai  $C_B$  simulasi dan  $C_A$  simulasi diperoleh dari penyelesaian Persamaan (20) dan (21) secara simultan. Nilai konsentrasi jenuh  $\text{CO}_2$  dalam larutan ( $C_A^*$ ) diperoleh dari korelasi tetapan Henry

dengan tekanan sistem seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (8). Dari Daftar II dan Gambar 5 dapat dilihat bahwa pada saat  $t = 0$  konsentrasi  $\text{CO}_2$  dalam cairan ( $C_A$ ) = 0, kemudian terus bertambah sampai akhirnya konstan pada kondisi jenuhnya. Dengan cara yang sama, lalu dapat dihitung nilai-nilai  $K_L a$  dan  $k_{mn}$  untuk percobaan dengan  $C_{B,0}$  yang berbeda dan hasilnya ditunjukkan pada Daftar III.

Untuk memperjelas kecenderungan perubahan nilai-nilai  $K_L$ ,  $k_{mn}$ , dan  $d_g$  sebagai fungsi dari konsentrasi awal KOH dalam larutan ( $C_{B,0}$ ), maka data pada Daftar III dibuat grafiknya yang masing-masing ditunjukkan pada Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8.

Daftar II. Hasil simulasi dan bandingannya dengan data percobaan profil konsentrasi KOH di fasa cair ( $C_B$ ),  $C_A$ , dan  $C_A^*$  sebagai fungsi waktu ( $C_{B,0} = 0,2436 \text{ gmol/L}$ ,  $T = 301 \text{ K}$ ,  $Q_G = 0,1 \text{ mL/detik}$ ,  $p_A = 1,0314 \text{ atm}$ , dan  $N_r = 200 \text{ rpm}$ ).

Waktu [menit]	$C_B$ percobaan [gmol/L]	$C_B$ simulasi [gmol/L]	$C_A$ simulasi [gmol/L]	$C_A^*$ [gmol/L]
0	0,2436	0,2436	0,0000	0,0313
2	0,2082	0,1949	0,0153	0,0313
4	0,1672	0,1410	0,0178	0,0313
6	0,1348	0,0973	0,0204	0,0313
8	0,1045	0,0638	0,0229	0,0313
10	0,0708	0,0399	0,0253	0,0313



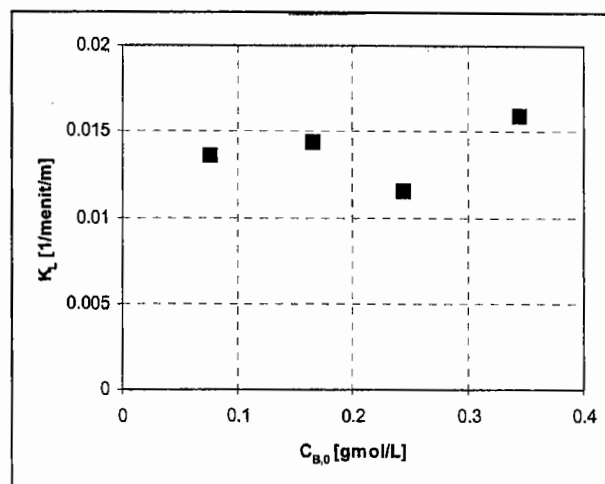
Gambar 5. Grafik hasil simulasi dan bandingannya dengan data percobaan untuk  $C_{B,0} = 0,2436 \text{ gmol/L}$ .

Daftar III, Gambar 6, dan Gambar 7 menunjukkan bahwa makin besar konsentrasi awal KOH dalam larutan penyerap, maka makin besar pula nilai koefisien perpindahan massa dan konstanta kecepatan reaksinya. Hal ini menunjukkan bahwa dengan naiknya konsentrasi KOH dalam larutan penyerap maka perpindahan massa gas ke fasa cair berjalan makin cepat. Fenomena ini

terjadi karena dengan memperbesar konsentrasi zat pereaksi, dalam hal ini larutan KOH, maka kecepatan reaksi yang terjadi di fasa cair berlangsung semakin cepat. Dengan demikian, maka konsumsi  $\text{CO}_2$  juga menjadi semakin besar.

Daftar III. Hasil perhitungan nilai  $K_L a$ ,  $K_L$ ,  $k_{mn}$ , dan  $d_g$  untuk berbagai  $C_{B,0}$  ( $T = 301 \text{ K}$ ,  $Q_G = 0,1 \text{ mL/detik}$ ,  $p_A = 1,0314 \text{ atm}$ , dan  $N_r = 200 \text{ rpm}$ ).

$C_{B,0}$ [gmol/L]	$K_L a$ [1/menit]	$K_L$ [1/menit/m]	$k_{mn}$ [L/gmol/menit]	$d_g$ [mm]
0,0752	0,0170	0,01364	0,089999	2,079
0,1655	0,0180	0,01442	0,095999	2,077
0,2436	0,0200	0,01601	0,097300	2,075
0,3445	0,0201	0,01599	0,124000	2,073



Gambar 6. Grafik hubungan antara  $K_L$  dengan  $C_{B,0}$  ( $T = 301 \text{ K}$ ,  $Q_G = 0,1 \text{ mL/detik}$ ,  $p_A = 1,0314 \text{ atm}$ , dan  $N_r = 200 \text{ rpm}$ ).

Kenaikan kecepatan reaksi di fasa cair dengan naiknya  $C_{B,0}$  ini juga terlihat dari semakin besarnya nilai konstanta kecepatan reaksinya. Dalam hubungannya dengan konsentrasi awal larutan KOH, dapat dijelaskan bahwa dengan semakin besarnya konsentrasi larutan, maka faktor kebolehhaduan terjadinya tumbukan antar molekul zat pereaksi menjadi semakin besar. Hal ini sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa untuk reaksi berorder 2 atau lebih, maka nilai konstanta kecepatan reaksinya dipengaruhi oleh konsentrasi awal zat pereaksinya.

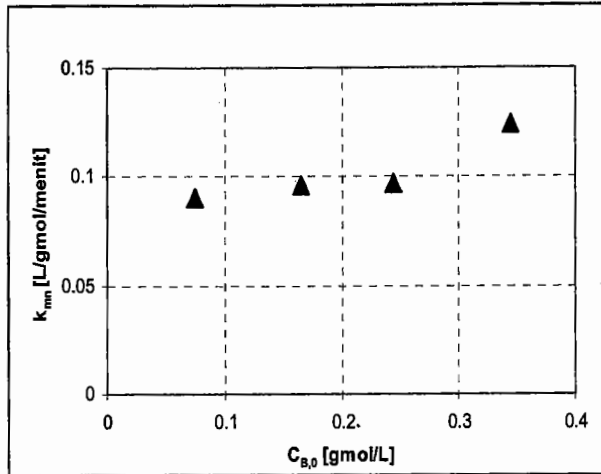
Daftar III dan Gambar 8 juga menunjukkan bahwa dengan naiknya konsentrasi awal larutan KOH, maka diameter gelembung gas rerata menjadi semakin kecil. Hal ini terjadi karena dengan perubahan konsentrasi larutan, maka viskositas dan tegangan muka fluidanya juga mengalami perubahan. Dengan semakin kecilnya diameter rerata gelembung, maka

luas total permukaan perpindahan massa per satuan volumenya menjadi semakin besar. Hal ini membuat perpindahan massa berlangsung semakin baik.

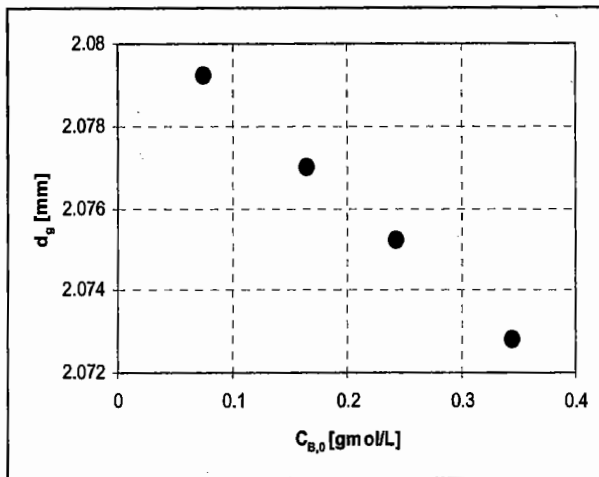
Persamaan empiris untuk memformulasikan hubungan antara koefisien perpindahan massa ( $K_L$ ) dengan konsentrasi larutan KOH awal ( $C_{B,0}$ ) pada kondisi operasi di atas adalah:

$$K_L = 0,0017 \ln C_{B,0} + 0,0179 \quad (27)$$

dengan kesalahan relatif rerata 1,92%, untuk kisaran  $C_{B,0}$  dari 0,0752 gmol/L sampai dengan 0,3445 gmol/L.



Gambar 7. Grafik hubungan antara  $k_{mn}$  dengan  $C_{B,0}$  ( $T = 301 \text{ K}$ ,  $Q_G = 0,1 \text{ mL/detik}$ ,  $p_A = 1,0314 \text{ atm}$ , dan  $N_r = 200 \text{ rpm}$ ).



Gambar 8. Grafik hubungan antara  $d_g'$  dengan  $C_{B,0}$  ( $T = 301 \text{ K}$ ,  $Q_G = 0,1 \text{ mL/detik}$ ,  $p_A = 1,0314 \text{ atm}$ , dan  $N_r = 200 \text{ rpm}$ ).

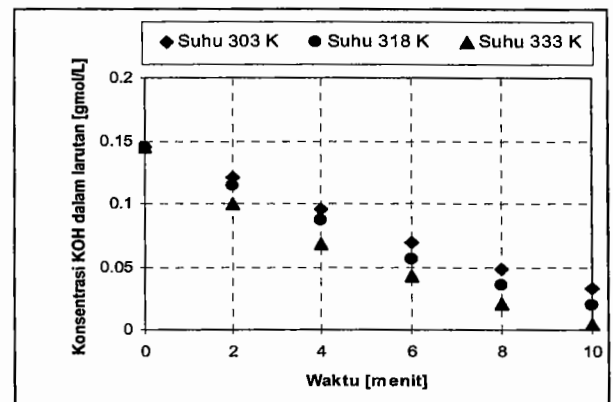
### Pengaruh Suhu

Penurunan konsentrasi KOH sebagai fungsi waktu untuk berbagai suhu operasi ditunjukkan pada Daftar IV. Data pada Daftar IV diperoleh untuk

percobaan dengan konsentrasi awal KOH 0,1453 gmol/L, kecepatan volumetrik  $\text{CO}_2$  0,1 mL/detik, tekanan operasi 1,0314 atm, dan kecepatan putaran pengaduk 200 rpm. Dari data pada Daftar IV lalu dibuat grafik hubungan antara konsentrasi KOH sebagai fungsi waktu untuk berbagai suhu operasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.

Daftar IV. Konsentrasi KOH ( $C_B$ ) sebagai fungsi waktu untuk berbagai suhu operasi ( $C_{B,0} = 0,1453 \text{ gmol/L}$ ,  $Q_G = 0,1 \text{ mL/detik}$ ,  $p_A = 1,0314 \text{ atm}$ , dan  $N_r = 200 \text{ rpm}$ ).

Waktu [menit]	Konsentrasi [gmol/L]		
	Suhu = 303 K	Suhu = 318 K	Suhu = 333 K
0	0,14530	0,1453	0,1453
2	0,12033	0,1144	0,0996
4	0,09510	0,0863	0,0684
6	0,06957	0,0563	0,0429
8	0,04831	0,0352	0,0205
10	0,03322	0,0193	0,0047



Gambar 9. Grafik konsentrasi KOH sebagai fungsi waktu untuk berbagai suhu operasi.

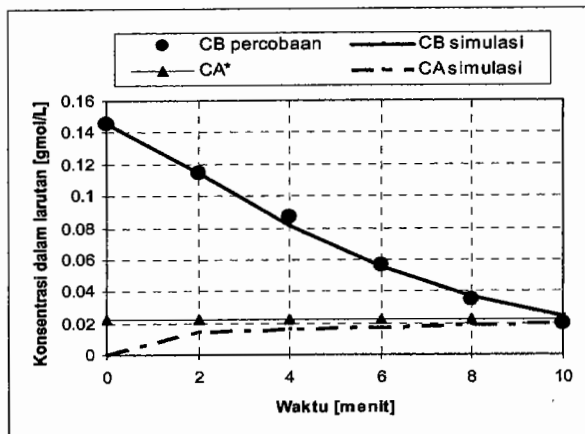
Daftar IV dan Gambar 9 menunjukkan bahwa makin tinggi suhu operasi menyebabkan penurunan konsentrasi KOH sebagai fungsi waktu semakin cepat. Hal ini terjadi karena makin tinggi suhu operasi, maka konsumsi KOH semakin besar seiring dengan semakin cepatnya reaksi antara KOH dengan  $\text{CO}_2$  yang terjadi di fasa cair.

Hasil simulasi nilai konsentrasi KOH di fasa cair sebagai fungsi waktu selama proses absorpsi berlangsung dalam bandingannya dengan nilai konsentrasi KOH hasil percobaan untuk suhu operasi 318 K disajikan pada Daftar V. Pada Daftar V juga disajikan hasil simulasi kadar  $\text{CO}_2$  di fasa cair ( $C_A$ ) serta kadar  $\text{CO}_2$  setimbangnya ( $C_A^*$ ). Dari simulasi tersebut diperoleh nilai  $K_L a$  dan  $k_{mn}$  masing-masing adalah 0,026/menit dan 0,114 L/gmol/menit. Dari data pada Daftar V lalu dibuat grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.



Daftar V. Hasil simulasi dan data percobaan profil konsentrasi KOH di fasa cair ( $C_B$ ),  $C_A$ , dan  $C_A^*$  sebagai fungsi waktu untuk suhu operasi 318 K ( $C_{B,0} = 0,1453$  gmol/L,  $Q_G = 0,1$  mL/detik,  $p_A = 1,0314$  atm, dan  $N_r = 200$  rpm).

Waktu [menit]	$C_B$ percobaan [gmol/L]	$C_B$ simulasi [gmol/L]	$C_A$ simulasi [gmol/L]	$C_A^*$ [gmol/L]
0	0,1453	0,1453	0,0000	0,0219
2	0,1144	0,1141	0,0140	0,0219
4	0,0863	0,0812	0,0157	0,0219
6	0,0563	0,0557	0,0172	0,0219
8	0,0352	0,0370	0,0184	0,0219
10	0,0193	0,0240	0,0195	0,0219



Gambar 10. Perbandingan profil konsentrasi KOH dalam fasa cair antara data percobaan dan hasil simulasi untuk suhu operasi 318 K.

Hasil optimasi nilai koefisien perpindahan massa ( $K_L$ ) dan konstanta kecepatan reaksi ( $k_{mn}$ ) untuk berbagai suhu operasi disajikan pada Daftar VI. Untuk memperjelas kecenderungan perubahan nilai-nilai  $K_L$ ,  $k_{mn}$ , dan  $d_g$  sebagai fungsi dari suhu operasi atau suhu larutan ( $T$ ), maka data pada Daftar VI dibuat grafiknya yang masing-masing ditunjukkan pada Gambar 11, Gambar 12, dan Gambar 13.

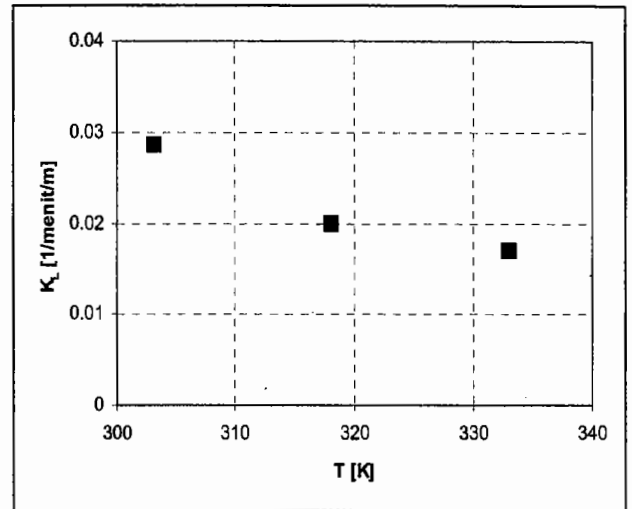
Dari Daftar VI, Gambar 11, dan Gambar 12 dapat dilihat bahwa dengan naiknya suhu operasi, maka nilai koefisien perpindahan massanya turun sedangkan nilai konstanta kecepatan reaksinya naik. Hal ini menunjukkan bahwa dengan kenaikan suhu operasi, maka kecepatan perpindahan massa gas  $CO_2$  ke fasa cair semakin kecil. Fenomena ini dapat dijelaskan dari sifat kelarutan gas dalam cairan, yaitu kenaikan suhu menyebabkan kelarutan gas dalam cairan semakin berkurang.

Walaupun dari segi kuantitas  $CO_2$  terserap semakin turun, namun kecepatan reaksi yang terjadi di fasa cair semakin tinggi seiring dengan naiknya suhu operasi. Hal ini terlihat dari semakin besarnya nilai konstanta kecepatan reaksi dengan naiknya suhu

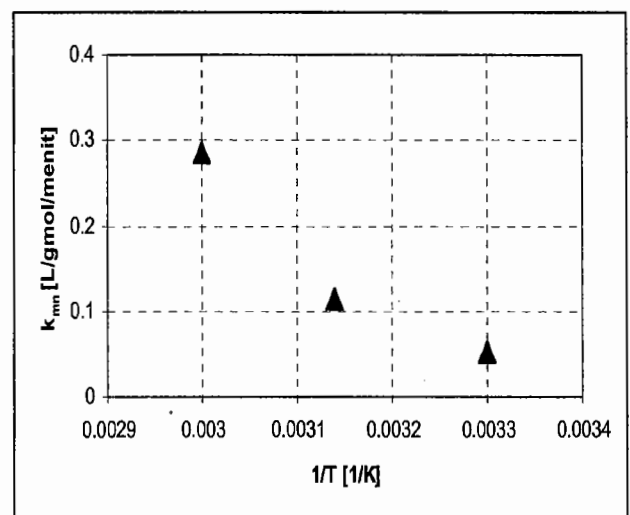
operasi. Keadaan ini sesuai dengan kaidah Arrhenius yang menyatakan bahwa konstanta kecepatan reaksi naik dengan naiknya suhu operasi.

Daftar VI. Pengaruh suhu operasi terhadap koefisien perpindahan massa, konstanta kecepatan reaksi, dan diameter gelembung gas ( $C_{B,0} = 0,1453$  gmol/L,  $Q_G = 0,1$  mL/detik,  $p_A = 1,0314$  atm, dan  $N_r = 200$  rpm).

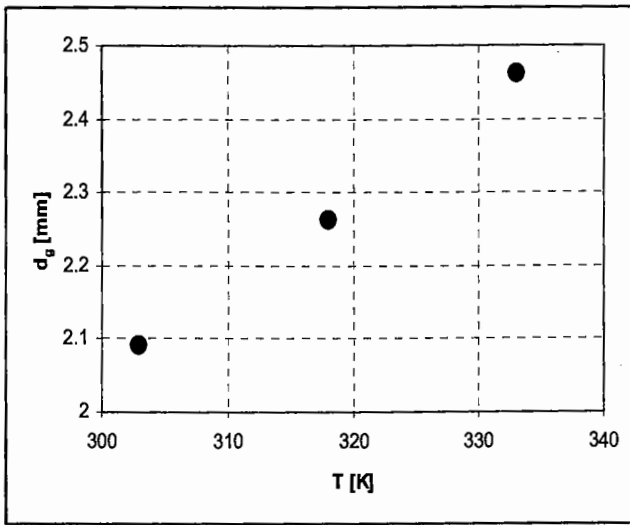
Suhu [K]	$K_L a$ [1/menit]	$K_L$ [1/menit/m]	$k_{mn}$ [L/gmol/menit]	$d_g$ [mm]
303	0,036	0,0287	0,051	2,092
318	0,026	0,0201	0,114	2,262
333	0,023	0,0172	0,286	2,461



Gambar 11. Grafik hubungan antara  $K_L$  dengan  $T$  ( $C_{B,0} = 0,1453$  gmol/L,  $Q_G = 0,1$  mL/detik,  $p_A = 1,0314$  atm, dan  $N_r = 200$  rpm).



Gambar 12. Grafik hubungan antara  $k_{mn}$  dengan  $1/T$  ( $C_{B,0} = 0,1453$  gmol/L,  $Q_G = 0,1$  mL/detik,  $p_A = 1,0314$  atm, dan  $N_r = 200$  rpm).



Gambar 13. Grafik hubungan antara  $d_g$  dengan  $T$  ( $C_{B,0} = 0,1453$  gmol/L,  $Q_G = 0,1$  mL/detik,  $p_A = 1,0314$  atm, dan  $N_r = 200$  rpm).

Persamaan empiris yang diperoleh berdasarkan data percobaan untuk memformulasikan hubungan antara konstanta kecepatan reaksi ( $k_{mn}$ ) dengan suhu operasi ( $T$ ) adalah:

$$k_{mn} = 10^7 \cdot \exp(-11.501,75/RT) \quad (28)$$

dengan kesalahan relatif rerata sebesar 3,78%. Persamaan (28) berlaku untuk kisaran suhu operasi 303 – 333 K.

Daftar VI dan Gambar 13 menunjukkan bahwa diameter gelembung rerata makin besar dengan naiknya suhu operasi/larutan penyerap. Hal ini terjadi karena makin tinggi suhu operasi menyebabkan makin rendahnya viskositas larutan. Dengan makin besarnya ukuran rerata gelembung, maka luas perpindahan massa total per satuan volumenya menjadi makin kecil. Dengan demikian menyebabkan proses perpindahan massanya menjadi kurang baik.

#### Perbandingan dengan Hasil Peneliti Lain

Pohorecky dan Moniuk (1988) menyajikan hasil penelitiannya tentang konstanta kecepatan reaksi untuk reaksi antara  $\text{CO}_2$  dengan ion hidroksi! dalam air yang mengandung karbonat, klorid, bromide, nitrat, dan sulfat menggunakan teknik laminar-jet yang dijalankan pada suhu  $20^\circ\text{C}$ . Konstanta kecepatan reaksi tersebut didasarkan pada kecepatan reaksi menurut reaksi (2). Beberapa hasil tersebut dipilih dan disajikan pada Daftar VII.

Daftar VII. Nilai konstanta kecepatan reaksi menurut reaksi (2) pada suhu  $20^\circ\text{C}$ .

No.	Larutan Penyerap	$k_{OH^-} \times 10^{-4}$ nilai rerata dalam L/gmol/menit
1	1,030 N KOH – 2,4 N $\text{K}_2\text{CO}_3$	124,02
2	0,857 N KOH – 2,025 N KCl	93,6
3	0,86 N KOH – 1,95 N KBr	98,64
4	0,818 N KOH – 2,128 N $\text{KNO}_3$	87,66
5	0,806 N KOH – 0,670 N $\text{K}_2\text{SO}_4$	61,26

Nilai  $k_{mn}$  hasil penelitian ini untuk variasi  $C_{B,0}$  disajikan pada Daftar III dan untuk variasi suhu disajikan pada Daftar VI. Dari Daftar III dan Daftar VI dapat dilihat bahwa nilai  $k_{mn}$  jauh lebih kecil dibandingkan dengan nilai  $k_{OH^-}$ . Perbedaan ini kemungkinan karena perbedaan zat yang digunakan sebagai penyerap dan perbedaan alat penelitian yang digunakan. Dalam penelitian ini digunakan larutan KOH dalam air sebagai larutan penyerap, sedangkan dalam penelitian Pohorecky dan Moniuk (1988) ditambahkan karbonat, klorid, bromide, nitrat, dan sulfat ke dalam larutan KOH yang digunakan sebagai penyerap.

#### KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Peningkatan konsentrasi KOH, memperbesar nilai  $K_L$  dan nilai  $k_{mn}$ .
2. Peningkatan suhu operasi memperkecil nilai  $K_L$  tetapi memperbesar nilai  $k_{mn}$ .
3. Hubungan antara nilai  $K_L$  dengan nilai  $C_{B,0}$  pada suhu operasi 301 K dan tekanan operasi 1,0314 atm adalah:  
 $K_L = 0,0017 \ln C_{B,0} + 0,0179$ , dengan kesalahan relatif rerata 1,92%, untuk kisaran  $C_{B,0}$  dari 0,0752 gmol/L sampai dengan 0,3445 gmol/L.
4. Hubungan antara  $k_{mn}$  dengan  $T$  pada  $C_{B,0} = 0,1453$  gmol/L dan tekanan 1,0314 atm, adalah  $k_{mn} = 10^7 \cdot \exp(-11.501,75/RT)$  dengan kesalahan relatif rerata 3,78%, untuk kisaran suhu operasi 303 K sampai dengan 333 K.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Untung Budiman untuk bantuannya selama pelaksanaan penelitian ini.



## DAFTAR DAN ARTI LAMBANG

$C_A, C_{A,L}$	= konsentrasi CO <sub>2</sub> di fasa cair, gmol/L
$C_{A,i}$	= konsentrasi CO <sub>2</sub> di <i>interface</i> , gmol/L
$C_A^*$	= konsentrasi CO <sub>2</sub> pada kesetimbangan, gmol/L
$C_B$	= konsentrasi KOH di fasa cair, gmol/L
$C_{B,0}$	= konsentrasi KOH mula-mula di fasa cair, gmol/L
$g_c$	= percepatan gravitasi, 9,8 m/detik <sup>2</sup>
$H_A$	= tetapan Henry CO <sub>2</sub> dalam larutan, atm/(gmol/L)
$H_A^o$	= tetapan Henry CO <sub>2</sub> di air, atm/(gmol/L)
$K$	= 2,25 (untuk larutan elektrolit)
$K_{La}$	= koefisien perpindahan massa volumetris keseluruhan, 1/detik
$K_L$	= koefisien perpindahan massa keseluruhan, m/detik
$k_{mn}$	= konstanta kecepatan reaksi orde m+n, L/gmol/menit
$p_{A,G}$	= tekanan parsial CO <sub>2</sub> dalam bulk fasa gas, atm
$p_{A,i}$	= tekanan parsial CO <sub>2</sub> dalam fasa gas pada lapisan <i>interface</i> , atm
$P_G$	= power yang dihasilkan <i>impeller</i> dengan aliran gas, W/m <sup>3</sup>
$Q_G$	= debit aliran gas CO <sub>2</sub> , mL/s
$R$	= tetapan gas umum, 1,987 cal/(gmol. K)
$T$	= suhu, K
$V_a$	= volume HCl untuk titrasi sampai titik ekuivalen I dalam $V$ mL larutan, mL
$V_b$	= volume HCl untuk titrasi sampai titik ekuivalen II dalam $V$ mL larutan, mL
$V_G$	= <i>superficial gas velocity</i> , m/detik
$V_t$	= <i>terminal velocity</i> untuk gelembung tunggal, m/detik
$a$	= luas permukaan per satuan volume, m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
$d_g$	= diameter rerata gelembung, mm
$k_{Ga}$	= koefisien perpindahan massa volumetris pada lapisan gas, 1/detik
$k_{La}$	= koefisien perpindahan massa volumetris pada lapisan cairan, 1/detik
$m$	= orde reaksi terhadap konsentrasi CO <sub>2</sub> dalam larutan = 1
$N$	= normalitas larutan
$N_r$	= kecepatan putaran pengaduk, rpm
$n$	= orde reaksi terhadap konsentrasi KOH dalam larutan = 1
$r_{A,ab}$	= kecepatan ansorpsi CO <sub>2</sub> , gmol/L/detik

$r_{A,reaksi}$	= kecepatan reaksi CO <sub>2</sub> , gmol/L/detik
$V$	= volume, m <sup>3</sup>
$V_L$	= volume total larutan, m <sup>3</sup>
$\rho_L$	= densitas larutan KOH, kg/m <sup>3</sup>
$\mu_L$	= viskositas larutan KOH, kg/m/s
$\mu_G$	= viskositas gas CO <sub>2</sub> , kg/m/s
$\sigma$	= tegangan muka larutan KOH, N/m
$\phi_G$	= gas holdup
$\theta$	= 0,4 (untuk larutan elektrolit)

## DAFTAR PUSTAKA

- Astarita, G., Savage, D.W., and Longo, J.M., 1981, Promotion of CO<sub>2</sub> Mass Transfer in Carbonate Solution, *Chem. Eng. Sci.*, 36581-588.
- Astarita, G., Savage, D.W., and Bisio, A., 1983, *Gas Treating with Chemical Solvent*, John Wiley & Sons, New York.
- Danckwerts, P.V. and McNeil, K.M., 1967, The Absorption of CO<sub>2</sub> into Aqueous Amine Solutions and Effects of Catalysis, *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, 45, T32-T49.
- Essaki, K., Nakagawa, K., Kato, M., and Uemoto, H., 2004, CO<sub>2</sub> Absorbtion by Lithium Silicate at Room Temperature, *J. Chem. Eng. Japan*, 37(6), 772-777.
- Levenspiel, O., 1972, *Chemical Reaction Engineering*, 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Pohorecky, R., and Moniuk, W., 1988, Kinetics of Reaction between Carbon Dioxide and Hydroxyl Ions in Aqueous Electrolyte Solutions, *Chem. Eng. Sci.*, 43, 1677-1684.
- Purwasasmita, M., 1985, *Training Centre PT Pupuk Kalimantan Timur*, PT. Pupuk Kalimantan Timur, Tbk.
- Sherwood, T.K. and Pigford, R.L., 1952, *Absorption and Extraction*, 2<sup>nd</sup> Ed., McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo.
- Shen, J.F., Yang, Y.M., and Maa, J.R., 1999, Promotion Mechanism for CO<sub>2</sub> Absorption into Partially Carbonated Ammonia Solutions, *J. Chem. Eng. Japan*, 32(3), 378-381.
- Treybal, R.E., 1981, *Mass Transfer Operations*, 3<sup>rd</sup> Ed., McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo.
- Wang, H.M. and Li, M.H., 2004, Kinetics of Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Solutions of 2-Amino-2-methyl-1-propanol + Diethanolamine, *J. Chem. Eng. Japan*, 37(2), 267-272.